# 柴达木盆地盐渍化土壤养分和酶活性特征

回 嵘, 谭会娟, 黄 磊, 李新荣
(中国科学院西北生态环境资源研究院,沙坡头沙漠研究试验站,甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 为探讨柴达木盆地不同程度盐渍化土壤养分和酶活性特征,沿察尔汗盐湖至昆仑山方向依次选择5个样点,分析土壤养分和酶活性特征及其二者的相关性。结果表明:除土壤全钾外,土壤盐渍化程度、土壤深度及其两者交互作用对土壤养分含量及土壤酶活性的影响均达到显著水平($P<0.05$)。在盐渍化程度较低的土壤,养分有效性(速效钾除外)和酶活性较高,且随土壤深度的增加而降低。以有机碳和蔗糖酶为例,在盐渍化程度最低的S5样地中含量为13.83 g·kg$^{-1}$和21.01 mg·g$^{-1}$·d$^{-1}$(0~5 cm)、12.85 g·kg$^{-1}$和19.29 mg·g$^{-1}$·d$^{-1}$(5~10 cm)、9.83 g·kg$^{-1}$和12.19 mg·g$^{-1}$·d$^{-1}$(10~20 cm),显著高于盐渍化程度最高S1中的8.56 g·kg$^{-1}$和1.41 mg·g$^{-1}$·d$^{-1}$(0~5 cm)、8.40 g·kg$^{-1}$和1.30 mg·g$^{-1}$·d$^{-1}$(5~10 cm)、8.33 g·kg$^{-1}$和1.26 mg·g$^{-1}$·d$^{-1}$(10~20 cm)。相关性分析表明,在盐渍化程度较低样地,土壤酶活性与大多数土壤养分之间呈显著或极显著正相关性($P<0.05$)。因此,柴达木盆地不同盐渍化程度土壤养分和酶活性特征存在明显差异,土壤盐渍化会降低土壤养分的有效性,抑制土壤酶的活性,降低土壤中有机物质的分解速率。

**关键词:** 盐渍化; 土壤酶活性; 土壤养分; 相关分析; 柴达木盆地

土壤盐渍化是影响全球生态环境和农业可持续发展的关键问题,严重制约着世界各国的经济发展,特别是在干旱、半干旱地区[1]。目前,全球盐渍土高达1×10$^9$ hm$^2$,约占陆地总面积的10%。其中,中国盐渍土面积约为0.99×10$^8$ hm$^2$,占全国耕地面积的6.62%[2]。土壤盐渍化直接影响着土壤物理、化学和生物学属性[3]。关于土壤盐渍化对土壤理化性质的影响,已有大量的研究报道[4-5]。除土壤理化性质外,土壤生物学属性也是评价土壤质量和健康状况的重要指标。其中,土壤酶作为土壤中微生物活动的产物,参与土壤中的生物化学过程[6]。土壤酶对环境变化十分敏感,其活性大小与土壤物理属性、化学属性以及微生物特性等相关,在一定程度上反映了土壤养分的转化状况及土壤的综合肥力[7]。近年来,关于盐渍化土壤酶活性的研究,也得到了国内外学者的关注,大多研究聚焦于不同类型盐渍化土壤酶活性分布特点以及盐渍土改良过程中土壤酶活性的变化规律[8-9],但对于我国柴达木盆地不同盐渍化程度土壤酶活性的评估研究还相对较少。本文以柴达木盆地不同盐渍化土壤为研究对象,进行土壤养分含量和土壤酶活性的研究,分析不同盐渍化程度的土壤养分和土壤酶活性特征,进一步阐明土壤酶活性与土壤养分之间的相关性,以期衡量柴达木盆地盐渍化土壤肥力水平以及退化程度,为柴达木盆地盐渍化土壤资源的利用与修复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

柴达木盆地位于青藏高原北部边缘,地跨35°00′~39°20′N、90°16′~99°16′E,海拔2427~6212 m,总面积约2.75×10$^5$ km$^2$,是我国重要的内陆山盆地[10-11]。盆地气候干旱少雨,蒸发量大,沙漠化面积大,属典型的高原大陆性气候。年降水量自东南部的200 mm递减到西北部的15 mm;年平均气温为1.1~5.1 ℃,昼夜温差大,日较差最大值达30 ℃以上;年平均蒸发量为2200~3500 mm,≥0 ℃年积温2000~2800 ℃;

**收稿日期:** 2023-02-22; **修订日期:** 2023-06-25
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(32061123006);甘肃省科技计划项目(22JR5RA063);中国科学院"西部之光"一般项目(xbzglzb2022019)
**作者简介:** 回嵘(1985-),女,副研究员,主要从事干旱区土壤生态学研究. E-mail: huirong@lzb.ac.cn
**通讯作者:** 李新荣. E-mail: lxinrong@lzb.ac.cn

年平均日照时数在3000 h以上。由于特殊的气候、水文等条件的影响,以及人们不合理的耕灌制度,使该地区土壤盐渍化程度、盐渍化面积越来越重[12]。位于柴达木盆地中东部的察尔汗盐湖是柴达木四大盐湖中面积最大、储量最丰的盐湖,东西长约168 km,南北宽20~40 km,面积达5856 km$^2$[13]。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样点选择　为了比较柴达木盆地不同程度盐渍化土壤酶活性的差异,依据植被盖度、盐壳厚度和盐度(电导率表示),沿察尔汗盐湖至昆仑山方向依次选取5个样点,分别为样点1~样点5(S1~S5,图1和表1)。于2019年4月采集不同深度土壤样品,每一样点土壤样品采用土钻进行五点采样,取样土层分别为0~5 cm、5~10 cm和10~20 cm,同层土样混合均匀,分为两份,分别装入无菌自封袋,一份风干过筛后,进行土壤养分含量测定;另一份保存于4 ℃,研磨过筛去除植物根系等杂质,进行土壤酶活性测定。

1.2.2 测定方法　土壤pH和电导率的测定分别采用pH计和电导率仪在土水比为1∶5(w/v)的悬浮液中测定[14]。土壤养分含量测定依据中国科学院南京土壤研究所[14]的方法。其中,土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、土壤全磷(TP)、土壤全钾(TK)、土壤速效磷(AP)和土壤速效钾(AK)含量的测定分别采用重铬酸钾容量法(外加热)、凯氏定氮法、氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法、氢氧化钠熔融-火焰光度计法、碳酸氢钠-钼锑抗比色法和乙酸铵提取-火焰光度计法。

土壤酶活性测定依据关松荫[15]的方法。土壤过氧化氢酶(CAT)、土壤脲酶(URE)、土壤蔗糖酶(SUC)和土壤脱氢酶(DHA)活性的测定分别采用高锰酸钾滴定法、靛酚蓝比色法、3, 5-二硝基水杨酸

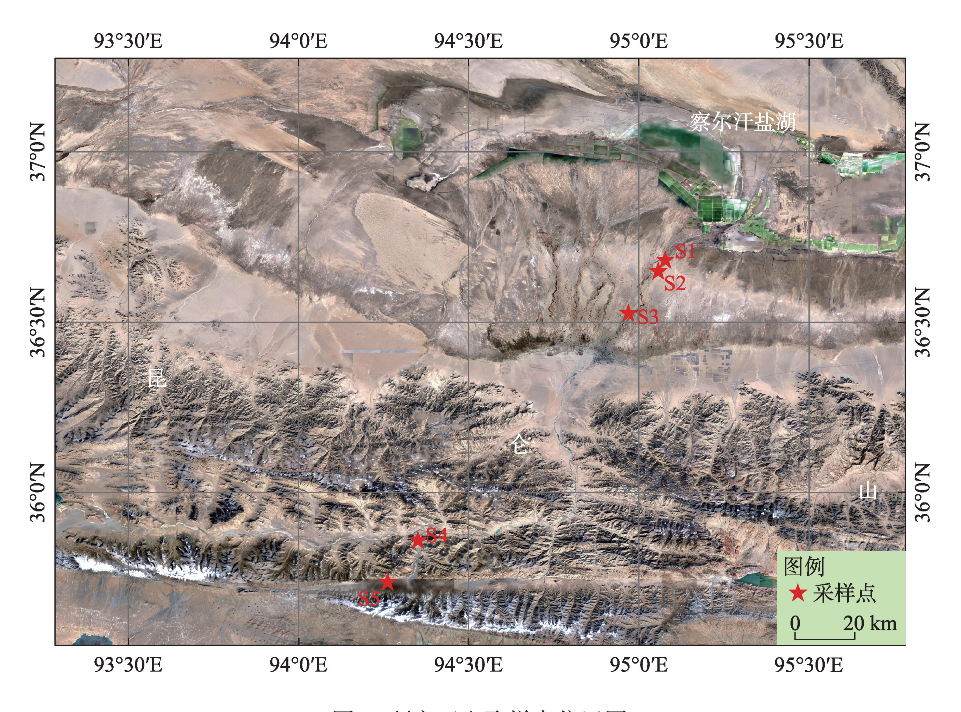



图1　研究区和取样点位置图

Fig. 1　Location of the study sites

表1　采样点基本情况

**Tab. 1　Basic properties of sampling sites**

| 样点 | 经纬度 | 海拔/m | 盐壳厚度/cm | 电导率/(dS·m$^{-1}$) | pH | 植被盖度/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | 36°41′02″ N,95°04′40″ E | 2719 | 30±4 | 23.9±1.2 | 8.73±0.038 | 0±0 |
| S2 | 36°39′04″ N,95°03′27″ E | 2720 | 25±2 | 23.4±1.0 | 8.71±0.035 | 20±3 |
| S3 | 36°31′41″ N,94°58′12″ E | 2750 | 3±1 | 17.7±4.0 | 8.45±0.026 | 45±5 |
| S4 | 35°51′41″ N,94°21′06″ E | 3811 | 0±0 | 6.5±0.2 | 8.54±0.048 | 30±5 |
| S5 | 35°44′19″ N,94°15′45″ E | 4123 | 0±0 | 6.2±0.4 | 8.58±0.061 | 20±4 |

比色法和2,3,5-氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法。

1.2.3 数据统计　所有实验数据均为平均值±标准差(SD)。运用SPSS 20.0统计分析软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA),探究不同程度盐渍化土壤酶活性的显著性差异;采用Correlate进行相关性分析土壤酶活性与土壤养分的相关关系。为了检验土壤盐渍化程度、土壤深度及其两者之间交互作用对土壤养分及土壤酶活性的影响,采用Duncan法进行双因素方差分析(Two-way ANOVA),差异显著水平用$P<0.05$表示。统计分析前,将试验数据进行对数转换,使数据服从正态分布。利用Origin 8.6制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同程度盐渍化土壤养分含量差异

双因素方差分析表明,除土壤盐渍化程度与土壤深度交互作用对土壤全钾含量不存在显著影响外,土壤盐渍化程度、土壤深度及其两者之间的交互作用对土壤养分含量均具有显著影响,且土壤盐渍化程度的作用明显大于两者之间的交互作用(表2,$P<0.001$)。对于同一深度土壤,随着土壤盐渍化程度的减弱,SOC、TN、TP、TK、AP含量显著增加(图2,$P<0.05$),而随着土壤盐渍化程度的减弱,土壤速效钾含量表现出明显降低的趋势(图2,$P<0.05$)。对于同一盐渍化程度的土壤,随土壤深度增加其养分含量呈现逐渐降低的总趋势(图2)。

### 2.2 不同程度盐渍化土壤酶活性差异

双因素方差分析表明,土壤盐渍化程度、土壤深度及其两者之间的交互作用对土壤酶的影响均达到显著水平,且土壤盐渍化程度对土壤四种酶活性的抑制作用明显大于土壤深度及其两者之间的交互作用(表3,$P<0.05$)。在相同深度土壤中,随着土壤盐渍化程度的增加,土壤酶活性显著降低,在盐渍化程度最低的S5样地,土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶及脱氢酶活性达到最高值(图3,$P<0.05$)。在相同盐渍化程度土壤中,随着土壤深度由浅到深,土壤酶活性逐渐降低,在10~20 cm土壤中,土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶及脱氢酶活性最低(图3)。

### 2.3 不同程度盐渍化土壤酶活性与土壤养分间的相关性分析

不同程度盐渍化土壤酶活性与土壤养分含量的相关性分析表明,盐渍化程度较重的样地中土壤酶活性与极个别土壤养分之间有显著相关性,其中S1样地中,脲酶与土壤养分关系相对密切;S2样地中,过氧化氢酶和脱氢酶与土壤养分关系相对密切(表4,$P<0.05$)。而随着盐渍化程度的减弱,在S4和S5样地中土壤酶活性与绝大部分土壤养分之间呈显著或极显著正相关性,其中土壤酶活性与速效钾含量之间有显著的正相关关系(表4,$P<0.05$或$P<0.01$)。这说明这4种酶活性能够较好地反映S3~S5样地土壤养分状况。

## 3 讨 论

### 3.1 土壤盐渍化程度对土壤养分的影响

土壤养分含量是反映土壤肥力水平的重要指标之一[16]。本研究中柴达木盆地不同盐渍化程度土壤养分含量差异显著,除土壤速效钾之外,其余土壤养分含量均随盐渍化程度的减轻而显著增加(图2,$P<0.05$),这表明盐渍化程度的加剧显著抑制了土壤肥力。这与前人的研究结果一致[17-18],土壤养分有效性随盐渍化水平升高而降低。盐渍化土壤中盐分的积累,降低了土壤中微生物数量和活

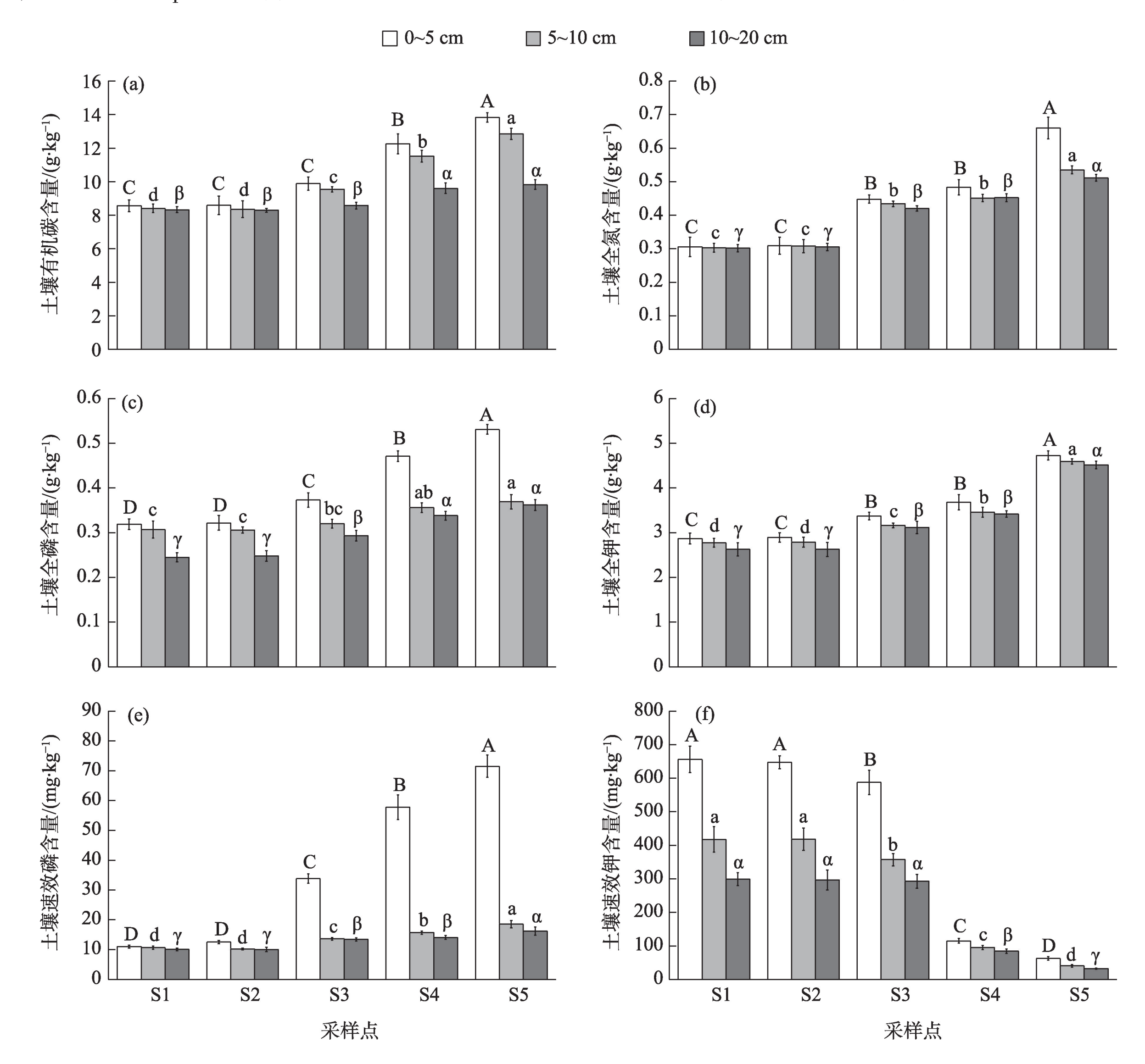
**表2 土壤盐渍化程度(S)及土壤深度(D)对土壤养分含量影响的双因素方差分析结果**

**Tab. 2 Results of soil nutrient contents and soil depths and their interactions on soil enzymes activity based on two-way analysis of variance(ANOVA)**

| 土壤养分含量 | 土壤盐渍化程度(S) | | 土壤深度(D) | | S×D | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *F* | *P* | *F* | *P* | *F* | *P* |
| SOC | 69.000 | <0.001 | 30.998 | <0.001 | 5.894 | <0.001 |
| TN | 124.843 | <0.001 | 8.767 | <0.01 | 3.543 | <0.01 |
| TP | 63.649 | <0.001 | 90.459 | <0.001 | 6.958 | <0.001 |
| TK | 138.802 | <0.001 | 6.277 | <0.01 | 0.095 | >0.05 |
| AP | 409.084 | <0.001 | 1086.806 | <0.001 | 214.806 | <0.001 |
| AK | 705.333 | <0.001 | 335.737 | <0.001 | 42.084 | <0.001 |

注:SOC、TN、TP、TK、AP和AK分别代表土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷、土壤全钾、土壤速效磷和土壤速效钾。下同。

性,从而影响了土壤中碳、氮、磷、钾等营养元素的有效转换,进而降低了土壤养分的有效性[18-19]。此外,土壤pH过高会导致大量的氮通过硝态氮和铵态氮的形式流失,引起土壤中氮元素含量较低的原因;同时较高的pH也会降低土壤磷的有效性[20]。土壤速效钾含量随着土壤盐渍化程度的减轻而显著降低,这可能是因为随着土壤盐渍化程度的减轻,距离察尔汗盐湖越远,而察尔汗盐湖是我国储量最大的钾镁盐矿,富含钾、钠、镁等资源[21],导致察尔汗盐湖周边土壤具有高含量的速效钾。在垂




注:数据为平均值±标准差($n$=3),不同大小写字母和希腊字母分别表示0~5 cm、5~10 cm和10~20 cm差异显著($P$<0.05)。下同。

图2　不同程度盐渍化土壤养分含量变化

Fig. 2　Variances of soil nutrient contents in different levels of soil salinization

**表3　土壤盐渍化程度和土壤深度对土壤酶活性影响的双因素方差分析**

**Tab. 3　Soil salinization levels and soil depths and their interactions on soil enzymes activity based on two-way ANOVA**

| 土壤酶活性 | 土壤盐渍化程度(S) | | 土壤深度(D) | | S×D | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *F* | *P* | *F* | *P* | *F* | *P* |
| CAT | 996.079 | <0.001 | 32.293 | <0.001 | 5.067 | <0.001 |
| URE | 108.454 | <0.001 | 29.023 | <0.001 | 5.509 | <0.001 |
| SUC | 717.031 | <0.001 | 40.592 | <0.001 | 19.330 | <0.001 |
| DHA | 87.365 | <0.001 | 77.159 | <0.001 | 2.836 | <0.05 |

注:CAT、URE、SUC和DHA分别代表土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶及脱氢酶活性。下同。

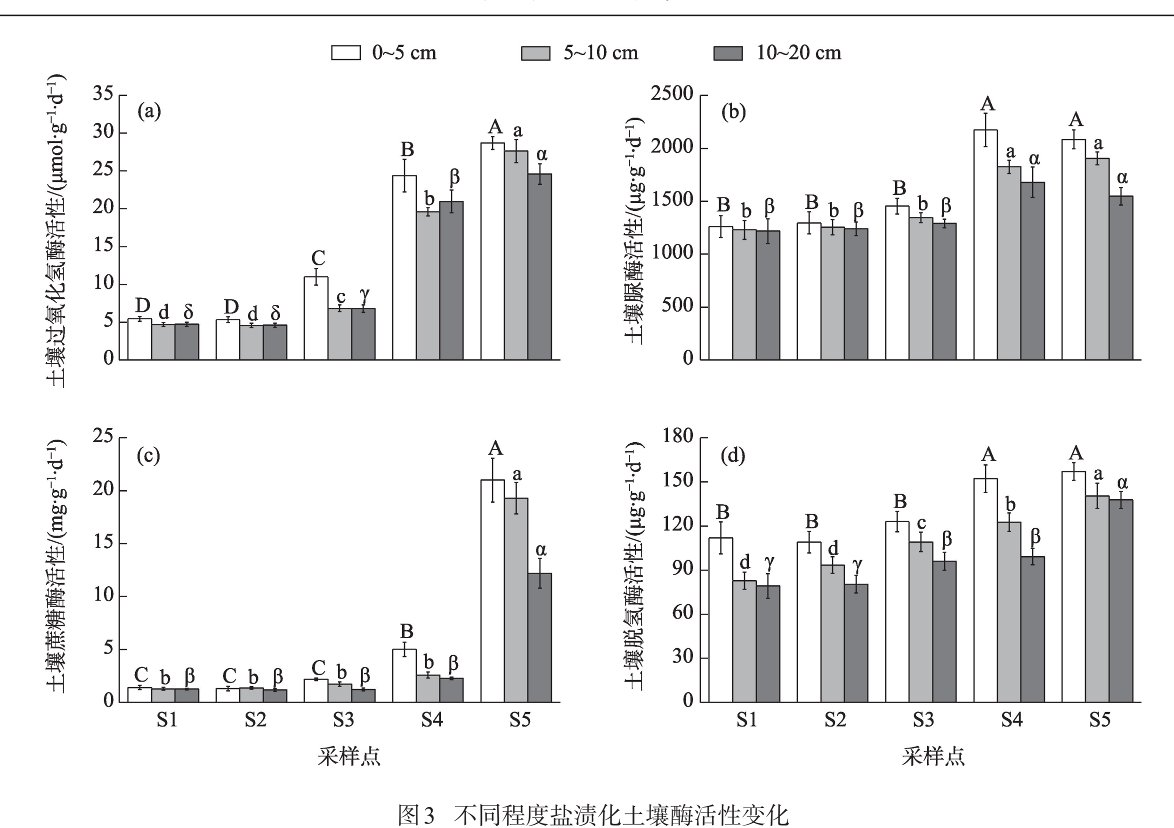



图3 不同程度盐渍化土壤酶活性变化

Fig. 3 Variances of soil enzymes activity in different levels of soil salinization

表4 不同盐渍化土壤酶活性与土壤养分的相关性分析

**Tab. 4 The correlation analysis results between soil enzymes activity and soil nutrients of different levels of soil salinization**

| 样点 | 酶活性 | 土壤养分含量 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | SOC | TN | TP | TK | AP | AK |
| S1 | CAT | 0.234 | 0.354 | 0.305 | 0.501 | 0.561 | 0.788* |
| | URE | 0.476 | 0.707* | 0.045 | 0.855* | 0.410 | 0.160 |
| | SUC | 0.475 | 0.174 | 0.555 | 0.222 | 0.032 | 0.443 |
| | DHA | 0.039 | −0.060 | 0.508 | 0.417 | 0.608 | 0.885** |
| S2 | CAT | 0.205 | −0.225 | 0.418 | 0.553 | 0.899** | 0.702* |
| | URE | 0.086 | −0.131 | 0.029 | 0.234 | 0.464 | 0.368 |
| | SUC | −0.025 | 0.025 | 0.228 | 0.131 | 0.335 | 0.314 |
| | DHA | 0.361 | −0.106 | 0.658 | 0.525 | 0.901** | 0.884** |
| S3 | CAT | 0.586 | 0.681* | 0.860** | 0.699* | 0.965** | 0.970** |
| | URE | 0.630 | 0.823** | 0.909** | 0.513 | 0.794* | 0.868** |
| | SUC | 0.739* | 0.716* | 0.876** | 0.549 | 0.807** | 0.908** |
| | DHA | 0.702* | 0.660 | 0.776* | 0.724* | 0.804** | 0.910** |
| S4 | CAT | 0.560 | 0.730* | 0.772* | 0.695* | 0.842** | 0.803** |
| | URE | 0.835** | 0.766* | 0.896** | 0.780* | 0.879** | 0.879** |
| | SUC | 0.746* | 0.690* | 0.962** | 0.648 | 0.975** | 0.926** |
| | DHA | 0.880** | 0.616 | 0.903** | 0.617 | 0.891** | 0.939** |
| S5 | CAT | 0.902** | 0.624 | 0.556 | 0.656 | 0.627 | 0.767* |
| | URE | 0.954** | 0.837** | 0.764* | 0.582 | 0.733* | 0.858** |
| | SUC | 0.933** | 0.710* | 0.651 | 0.758* | 0.623 | 0.756* |
| | DHA | 0.740* | 0.797* | 0.760* | 0.612 | 0.831** | 0.836** |

注：*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著。

直方向,土壤养分含量随土壤深度增加而降低(图2),呈现出表聚现象,这一结果与土壤养分含量空间分布的一般特征相一致[22-23],这可能与土壤表层凋落物及土壤微生物数量及活性相关[24]。

### 3.2 土壤盐渍化程度对土壤酶活性的影响

土壤酶活性对环境变化敏感,是土壤中一切生物化学反应的催化剂,在土壤生态系统物质循环和能量流动过程中发挥着重要作用[25-27]。植被组成、土壤养分、微生物数量及活性都能影响土壤酶活性[28]。本研究表明,在盐渍化土壤中过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和脱氢酶活性随着盐渍化程度的减弱而显著增强(图3,$P<0.05$),这与土壤养分含量的变化一致。土壤酶活性主要来源于土壤中微生物活性的分泌物,而盐渍化的加剧改变了土壤中微生物数量,进而影响了土壤酶活性[29]。Rath等[30]的研究也证明了在盐渍化程度较高的土壤中,土壤pH和含盐量均不适宜于微生物的生长,微生物数量和活性的减少引起土壤酶活性的减弱。此外,土壤酶活性随土壤深度增加而降低(图3),这与前人的研究结果一致[31-32]。究其原因,可能有以下两点:其一,灌木及草本植物的凋落物改善了表层土壤的微生物数量及种类,使得酶活性主要富集于土壤表层,且随着土壤深度的增加而降低[33];其二,土壤养分的表聚现象改善了表层土壤养分有效性及其透气性,从而促进了表层土壤微生物数量和活性[34-35],引起土壤表层土壤酶活性更高。

### 3.3 土壤酶活性与土壤养分间的相关性

土壤酶活性与土壤养分之间的关系较为复杂,不同酶活性受制于不同的土壤养分类型。对不同盐渍化土壤酶活性与土壤养分间的相关性分析表明,在盐渍化程度较高土壤中酶活性仅与极个别土壤养分之间有显著相关性(AK与CAT和DHA,TK与URE)。这可能是盐渍化程度较高土壤中高pH和低有机质限制了土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和脱氢酶活性。其他学者的研究结果也表明[33,36],土壤pH和有机质含量是影响土壤酶活性最主要的因子,高盐渍化条件下高pH抑制土壤酶活性,而低有机质含量直接影响土壤养分转换及有机质的分解,进而降低土壤酶活性。在盐渍化程度较低土壤中脱氢酶和蔗糖酶活性与有机质含量的显著相关性表明土壤具有较高有机物降解和微生物活动能力。作为影响土壤酶活性最主要的因子,有机质可以提供微生物所需的能量和营养物质,从而促进微生物的生长和活性,进而增加酶的活性[37]。脲酶活性与TN的显著正相关则表明在盐渍化程度较低土壤具有较高的氮素转化和利用能力。总体上看,在盐渍化程度较低土壤中土壤酶活性与绝大部分养分含量呈显著正相关,说明4种酶活性能够较好地反映盐渍化程度较低土壤养分状况,这可能与土壤盐渍化程度的降低有关。随盐渍化程度的降低,土壤酶活性显著升高,从而影响土壤中碳、氮、磷元素的有效转换,增加了土壤肥力[18]。与此同时,有机碳等养分含量的增加有利于提高过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和脱氢酶活性[9]。

## 4 结 论

柴达木盆地不同盐渍化程度土壤养分和酶活性特征有较大的差异。除土壤速效钾含量之外,土壤养分含量及土壤酶活性随着土壤盐渍化程度的减弱而增强,且随土壤深度的增加,土壤养分含量及酶活性呈逐渐降低的趋势。此外,在盐渍化程度较低的样地,土壤酶活性与大多数土壤养分之间呈显著或极显著正相关性(尤其是在盐渍化程度较低土壤中脱氢酶和蔗糖酶活性与有机质含量的显著相关性极为明显),土壤酶活性能够较好地反映盐渍化程度较低土壤的养分状况,可以作为评价该类型土壤肥力水平及退化过程的指标。总之,土壤盐渍化会降低土壤养分的有效性和利用率,高盐浓度会对土壤酶活性产生负面影响,抑制土壤酶的活性,降低土壤中有机物质的分解速率。

**参考文献(References):**

[1] 张体彬, 展小云, 冯浩. 盐碱地土壤酶活性研究进展和展望[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 495-500. [Zhang Tibin, Zhan Xiaoyun, Feng Hao. Research advance and prospect of soil enzymes activities in saline-alkali soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(2): 495-500. ]

[2] Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for saline soils: A review[J]. Land Degradation and Development, 2000, 11: 501-521.

[3] Tripathi S, Kumari S, Chakraborty A, et al. Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 42: 273-277.

[4] 武海雯, 杨秀艳, 王计平, 等. 沙枣改善盐碱土壤养分的研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3527-3534. [Wu Haiwen, Yang

Xiuyan, Wang Jiping, et al. A review on the improvement of salt-affected soil nutrients by *Elaeagnus angustifolia* L. [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(11): 3527–3534. ]

[5] 余冬梅, 祁兆鑫, 胡夏嵩, 等. 柴达木盆地尕斯库勒湖区盐生植物改良土壤盐渍化效应及其贡献评价[J]. 盐湖研究, 2020, 28(4): 91–101. [Yu Dongmei, Qi Zhaoxin, Hu Xiasong, et al. Effects and contribution assessment of halophytes in soil salinization improvement of Gas Hure Lake region in Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2020, 28(4): 91–101. ]

[6] 许华, 何明珠, 孙岩. 干旱荒漠区土壤酶活性对降水调控的响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(6): 790–797. [Xu Hua, He Mingzhu, Sun Yan. Response of soil enzyme activities to precipitation regulation in arid desert areas[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, 54(6): 790–797. ]

[7] 景宇鹏, 李跃进, 年佳乐, 等. 土默川平原不同盐渍化土壤酶活性特征的研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1538–1543. [Jing Yupeng, Li Yuejin, Nian Jiale, et al. Enzymatic activity of different salt affected soils in Tumochuan Plain[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(9): 1538–1543. ]

[8] Zhang T B, Wan S Q, Kang Y H, et al. Urease activity and its relationships to soil physiochemical properties in a highly saline-sodic soil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2014, 14: 304–315.

[9] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 银川平原不同类型盐渍化土壤酶活性及其与土壤养分间相关分析研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 121–126. [Li Fengxia, Wang Xueqin, Guo Yongzhong, et al. Study of soil enzymes activity and their correlation with soil nutrients in different types of saline-alkali soils in Yinchuan Plain of Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(7): 121–126. ]

[10] Jia S F, Zhu W B, Lv A F, et al. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115: 3069–3079.

[11] 李霞, 崔霞, 何晓菲, 等. 柴达木盆地水源涵养功能时空特征分析[J]. 草业科学, 2022, 39(4): 660–671. [Li Xia, Cui Xia, He Xiaofei, et al. Analyses of spatial and temporal characteristics of water conservation function in Qaidam Basin[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(4): 660–671. ]

[12] 严小功, 张金旭, 杨占云, 等. 柴达木盆地盐碱地现状及改良措施[J]. 农业与技术, 2020, 40(7): 18–20. [Yan Xiaogong, Zhang Jinxu, Yang Zhanyun, et al. Present situation and the improvement measure of saline-alkali land in Qaidam Basin[J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(7): 18–20. ]

[13] 韩光, 袁小龙, 韩积斌, 等. 察尔汗盐湖霍布逊区段资源开采过程中储卤层系统变化特征研究[J]. 地球学报, 2022, 43(5): 279–286. [Han Guang, Yuan Xiaolong, Han Jibin, et al. Comparative analysis on the characteristic changes of the brine reservoir system before and after exploration of the Qarhan Salt Lake (Huobuxun Area)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(5): 279–286. ]

[14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. [Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analysis of Soil Physico-chemical Properties[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. ]

[15] 关松荫. 土壤酶学研究方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1986. [Guan Songyin. Research Methods of Soil Enzymology[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 1986. ]

[16] 吴杰, 李向鹏, 陈鑫, 等. 重庆市涪陵区植烟土壤养分的适宜性评价及变异分析[J]. 土壤, 2020, 52(1): 106–112. [Wu Jie, Li Xiangpeng, Chen Xin, et al. Assessment of feasibility and variation analysis of nutrient contents in tobacco-growing soil in Fuling County, Chongqing[J]. Soils, 2020, 52(1): 106–112. ]

[17] 朱海强, 李艳红, 李发东. 近10年艾比湖湿地不同植物群落土壤水分-盐分-养分变化特征[J]. 西北植物学报, 2018, 38(3): 535–543. [Zhu Haiqiang, Li Yanhong, Li Fadong. Characteristics of soil moisture, salinity and nutrients in different plant communities of Ebinur Lake wetland during the past decade[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(3): 535–543. ]

[18] 陈孔飞, 张仁陟, 蔡立群, 等. 盐渍化对沙枣林土壤养分和酶活性的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2020, 4(5): 60–64. [Chen Kongfei, Zhang Renzhi, Cai Liqun, et al. Effects of salinization on soil nutrients and enzyme activities in *Elaeagnus angustifolia* forest[J]. Territory & Natural Resources Study, 2020, 4(5): 60–64. ]

[19] Singh K. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils [J]. Land Degradation and Development, 2015, 27: 706–718.

[20] 周利颖, 李瑞平, 苗庆丰, 等. 内蒙古河套灌区紧邻排干沟土壤盐渍化与肥力特征分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 114–122. [Zhou Liying, Li Ruiping, Miao Qingfeng, et al. Characteristics of salinization and fertility of saline-alkali soil adjacent to drain-age ditch in Hetao irrigation area of Inner Mongoli[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 114–122. ]

[21] 李瑞琴, 刘成林, 焦鹏程, 等. 现代盐湖低品位固体钾盐溶矿数值模拟研究——以察尔汗盐湖别勒滩矿区为例[J]. 地质学报, 2021, 95(7): 2150–2159. [Li Ruiqin, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, et al. Numerical simulation analysis on potash dissolution extraction from low-grade solid potash ore in modern Salt Lake: A case study from Bieletan mining area in the Qarhan salt Lake[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(7): 2150–2159. ]

[22] 李海强, 郭成久, 蔡楚雄, 等. 水土保持措施对坡耕地土壤养分时空差异影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 707–714. [Li Haiqiang, Guo Chengjiu, Cai Chuxiong, et al. Effect of soil and water conservation measures on temporal and spatial variability of soil nutrients in sloping farmland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(3): 707–714. ]

[23] 朱玉荷, 肖虹, 王冰, 等. 蒙古高原草地不同深度土壤碳氮磷化学计量特征对气候因子的响应[J]. 植物生态学报, 2022, 46(3): 340–349. [Zhu Yuhe, Xiao Hong, Wang Bing, et al. Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus along soil

depths in response to climatic variables in grasslands on the Mongolia Plateau[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(3): 340-349. ]

[24] 王雅, 刘爽, 郭晋丽, 等. 黄土高原不同植被类型对土壤养分、酶活性及微生物的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 62-68. [Wang Ya, Liu Shuang, Guo Jinli, et al. Influence of different vegetation types on soil nutrients, enzyme activities and microbial diversities in Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 62-68. ]

[25] 曹婷婷, 郭振. 土壤酶活性与土壤肥力关系的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2019, 9(6): 444-448. [Cao Tingting, Guo Zhen. Research advance of the relationship between soil enzyme activity and soil fertility[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 9(6): 444-448. ]

[26] 高转琴, 王丹, 牛灵安, 等. 冀南平原盐渍化改造区土壤过氧化氢酶活性变化研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1434-1441. [Gao Zhuanqin, Wang Dan, Niu Ling'an, et al. Catalase activities in salinized rehabilitation area of the southern Hebei plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1434-1441. ]

[27] 赵雅姣, 刘晓静, 吴勇, 等. 豆禾牧草间作根际土壤养分、酶活性及微生物群落特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(3): 219-228. [Zhao Yajiao, Liu Xiaojing, Wu Yong, et al. Rhizosphere soil nutrients, enzyme activities and microbial community characteristics in legume-cereal intercropping system in Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(3): 219-228. ]

[28] 张志山, 杨贵森, 吕星宇, 等. 荒漠生态系统C、N、P生态化学计量研究进展[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 48-56. [Zhang Zhishan, Yang Guisen, Lv Xingyu, et al. Research progresses in ecological stoichiometry of C, N and P in desert ecosystems[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(1): 48-56. ]

[29] 郭丽娜. 科尔沁盐渍化草地土壤生物活性及微生物多样性研究[D]. 辽宁: 东北大学, 2012. [Guo Lina. Soil Biological Activity and Microbial Diversity of Salinized Horqin Grassland[J]. Liaoning: Northeastern University, 2012. ]

[30] Rath K M, Maheshwari A, Bengtson P, et al. Comparative toxicities of salts on microbial processes in soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, 82: 2012-2020.

[31] 马文文, 姚拓, 靳鹏, 等. 荒漠草原2种植物群落土壤微生物及土壤酶特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 176-183. [Ma Wenwen, Yao Tuo, Jin Peng, et al. Characteristics of microorganisms and enzyme activity under two plant communities in desert steppe[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 176-183. ]

[32] 马晓俊, 李云飞. 腾格里沙漠东南缘植被恢复过程中土壤微生物量及酶活性[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 159-166. [Ma Xiaojun, Li Yunfei. Soil microbial biomass and enzyme activities during revegetation process in the southeastern fringe of the Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(6): 159-166. ]

[33] 景宇鹏, 李跃进, 姚一萍, 等. 盐渍化土壤酶活性及其与微生物、理化因子的关系[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(2): 128-138. [Jing Yupeng, Li Yuejin, Yao Yiping, et al. Enzyme activities of saline-alkali soil and its relationship with soil microbial biomass and physicochemical factor[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(2): 128-138. ]

[34] An S S, Huang Y M, Zheng F L. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China[J]. Applied Soil Ecology, 2009, 41: 286-292.

[35] Li X J, Yang H T, Shi W L, et al. Afforestation with xerophytic shrubs accelerates soil net nitrogen nitrification and mineralization in the Tengger Desert, Northern China[J]. Catena, 2018, 169: 11-20.

[36] 丁菡, 胡海波, 王人潮. 半干旱区土壤酶活性与其理化及微生物的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, 31(2): 13-19. [Ding Han, Hu Haibo, Wang Renchao. The relationships between soil enzyme activity and soil physical chemical properties or microbial biomass in semi-arid area[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2007, 31(2): 13-19. ]

[37] 包建平, 袁根生, 董方圆, 等. 生物质炭与秸秆施用对红壤有机碳组分和微生物活性的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 721-729. [Bao Jianping, Yuan Gensheng, Dong Fangyuan, et al. Effects of biochar application and straw returning on organic carbon fractionations and microbial activities in a red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 721-729. ]

# Characteristics of nutrient and enzyme activity in salt-affected soils of the Qaidam Basin

HUI Rong, TAN Huijuan, HUANG Lei, LI Xinrong

(Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

**Abstract:** To explore the characteristics of nutrient and enzyme activity in salt-affected soils of different degrees in the Qaidam Basin, five sampling points along the direction from Chahan Salt Lake to Kunlun Mountains were selected. The soil nutrient and enzyme activity characteristics and their correlations were analyzed. The results showed that soil salinization degree, soil depth, and their interactions significantly affected soil nutrient content and enzyme activity ($P<0.05$), except for soil total potassium. In soils with lower salinity, nutrient availability (except for available potassium) and enzyme activity were higher and decreased with increasing soil depth. Taking organic carbon and invertase as examples, the contents in the S5 sampling site with the lowest salinity degree were 13.83 $g\cdot kg^{-1}$ and 21.01 $mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$(0−5 cm), 12.85 $g\cdot kg^{-1}$ and 19.29 $mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$(5−10 cm), and 9.83 $g\cdot kg^{-1}$ and 12.19 $mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$(10−20 cm), significantly higher than those in the S1 site with the highest salinity degree, which had 8.56 $g\cdot kg^{-1}$ and 1.41 $mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$(0−5 cm), 8.40 $g\cdot kg^{-1}$ and 1.30 $mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$(5−10 cm), and 8.33 $g\cdot kg^{-1}$ and 1.26 $mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$(10−20 cm). The correlation analysis showed that in lower salinity areas, soil enzyme activity had a significant or extremely significant positive correlation with most soil nutrients ($P<0.05$). Therefore, differences were observed in the characteristics of soil nutrients and enzyme activity in salt-affected soils of different degrees in the Qaidam Basin. Soil salinization reduces the effectiveness of soil nutrients, inhibits soil enzyme activity, and reduces the decomposition rate of soil organic matter.

**Keywords:** salinization; soil enzymes activity; soil nutrient; correlation analysis; Qaidam Basin